

Hidrogeología urbana de la ciudad de Linares, México

René Alberto Dávila Pórcel, Héctor de León-Gómez y Luis Manuel Aranda Maltez

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Cd. Universitaria S/N, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México C.P.66451 Teléfono: 01 (81) 8329-4000 ext. 7257.

Mail de contacto: rene.alberto.davila@gmail.com

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es la determinación del impacto ambiental, generado por la actividad urbana de la ciudad de Linares en las aguas subterráneas (AS) y en los acuíferos de la zona utilizando la *Hidrogeología Urbana* (HU). La metodología empleada integró datos necesarios para realizar la evaluación hidrogeológica tradicional, posteriormente, se realizó un análisis de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos con la aplicación del método DRASTIC. En la investigación de HU se tomó en cuenta el análisis de los procesos de urbanización que involucra: análisis físico-poblacional, explotación del AS, distribución y uso del AS, cobertura del alcantarillado, comportamiento del nivel freático, calidad hidrogeoquímica del AS y distribución de nitratos (1981-2009) así como posibles fuentes contaminantes. Los resultados y conclusiones evidencian que la HU es una ciencia útil para estudiar los problemas de gestión, administración e impacto ambiental de la actividad antropogénica sobre los acuíferos en áreas urbanas.

Palabras clave: Hidrogeología, Urbana, Contaminación, Vulnerabilidad de Acuíferos.

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the environmental impact generated by urban activity of Linares city on groundwater (GW) and the aquifers in the study area, applying Urban Hydrogeology (UH). The methodology integrates data for a traditional hydrogeological evaluation. Subsequently an analysis of intrinsic vulnerability of aquifers, through DRASTIC method, was conducted. UH researches took into account the analysis of complex processes involving: physical-demographic growth, GW exploitation, GW use and distribution, sewer coverage, water table behavior, hydrogeochemical quality and distribution of nitrates into GW (1981-2009), as well as potential pollution sources. The results and conclusions show that the UH is could be a useful science to study aquifer management problems, GW resource administration and evaluate the environmental impact of human activities on aquifers in urban areas.

Keywords: Hydrogeology, Urban, Pollution, Aquifer Vulnerability.

Introducción

El agua es parte integral e indivisible del desarrollo sostenible y es reconocida como una de las cinco principales temáticas de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible desarrollada en Johannesburgo en el año 2002. (CMDS-Johannesburgo Agosto-Septiembre, 2002).

Siguiendo esta política de orden mundial, la conservación, la gestión y la protección del Agua Subterránea (AS) es una necesidad prioritaria en todas las ciudades del mundo; por tal razón, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH-1993) creó la "Comisión de aguas subterráneas en áreas urbanas" con el

objetivo de investigar el impacto del medio urbano sobre la calidad y cantidad del AS en las urbes a nivel mundial (Morris et al. 2006, Shanahan 2009, Vázquez-Suñe, Sánchez-Vila, and Carrera 2005).

Debido a la creciente problemática relacionada con la gestión del AS presente en las ciudades, surge la "Hidrogeología Urbana" nueva ciencia que investiga los procesos hidrodinámicos del AS y desempeña un rol preponderante en la solución de problemas de demanda de agua, contaminación de acuíferos, subsidencia y colapso de terreno, interacción con la infraestructura civil e inestabilidad de taludes en zonas urbanas (Custodio 2004, Llamas and Custodio 2003).

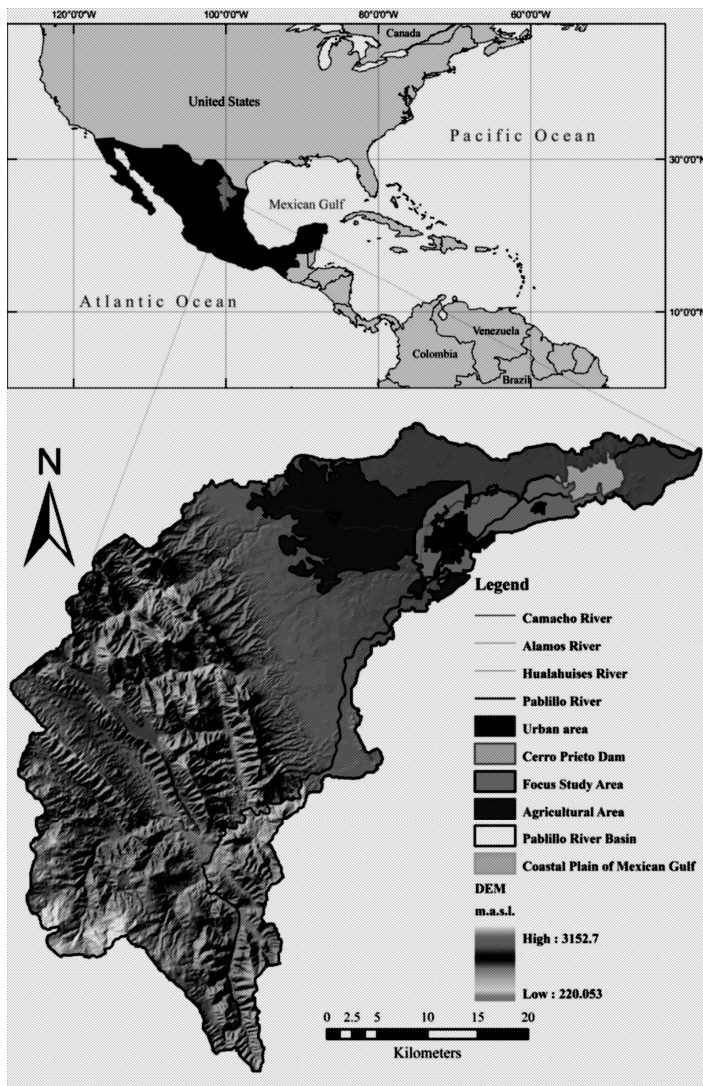


Figura 1. Área de estudio.

La ciudad de Linares está localizada a ~130km al sureste de la zona metropolitana de Monterrey (que es la ciudad más importante del noreste de México), la economía de la región se basa en cultivos agrícolas y la diversa actividad industrial recientemente implementada en el municipio (HAL 2010). El crecimiento físico de Linares se expandió 4.8 veces entre 1981 y 2009; a consecuencia del mismo, la población

se incrementó hasta alcanzar una densidad poblacional de ~16,000 hab/km² cuando en quinquenios anteriores no alcanzaba ni a 5 hab/km² (Dávila-Pórcel 2011, INEGI 2010).

El área de estudio está ubicada en el interior de la cuenca del río Pabllilo y sobre la Planicie Costera del Golfo de México (PCGM), la zona de mayor interés se ubica alrededor de la

ciudad de Linares en el estado de Nuevo León (Figura 1).

Geología

La Formación San Felipe, es la más antigua (Coniaciano-Santoniano), está compuesta por secuencias de calizas silificadas con bioturbación, areniscas, margas y rocas arcillosas sobrepuestas, areniscas verdosas y capas de bentonita; en las cercanías de la Presa Cerro Prieto tiene un espesor de ~75 metros (De León-Gómez 1993).

La Formación Méndez, que es la más extendida en la zona de estudio data del Campaniano-Maastrichtiano, esta formación es definida como una potente unidad arcillosa compuesta por estratos laminares delgados y medianos de margas-lutíticas con coloración gris oscuro y café amarillento, presenta alto grado de fracturamiento concoidal típica de esfuerzos de compresión y tensión (De la Garza-González 2000).

Los sedimentos más recientes (Terciario y Cuaternario), forman cinco terrazas aluviales con materiales acarreados de las rocas de la Sierra Madre Oriental (SMO); las terrazas más antiguas están ubicadas en las zonas altas de los lomeríos, mientras que las terrazas más jóvenes se ubican en los actuales cursos de

agua superficial y están conformadas por alternancias de gravas, arenas y lentes de arcillas y limos, posee permeabilidades variables dependiendo del grado de cementación y/o compactación (De la Garza-González 2000, Ruíz-Martínez and Werner 1997, Garza-Jiménez 1993).

Hidrogeología e hidroestratigrafía

Se identificaron dos unidades hidroestratigráficas, un acuífero de fracturas constituido por las lutitas de la Formación Méndez y calizas-lutitas-margas de la Formación San Felipe en la base; el otro acuífero es somero y de poros constituido por los materiales aluviales y conglomerados transportados desde la SMO a la PCGM.

Se determinó que el flujo preferencial del AS va de SW a NE en dirección hacia la Presa Cerro Prieto; en inmediaciones de la ciudad de Linares el flujo del AS es de tipo regional donde los niveles más profundos están alrededor de los 40 metros, mientras que las profundidades más someras se ubican aproximadamente en los 5 metros. En la Figura 2 se muestran las variaciones del nivel piezométrico en norias y pozos, medidos durante las rondas de muestreo y medición piezométrica.

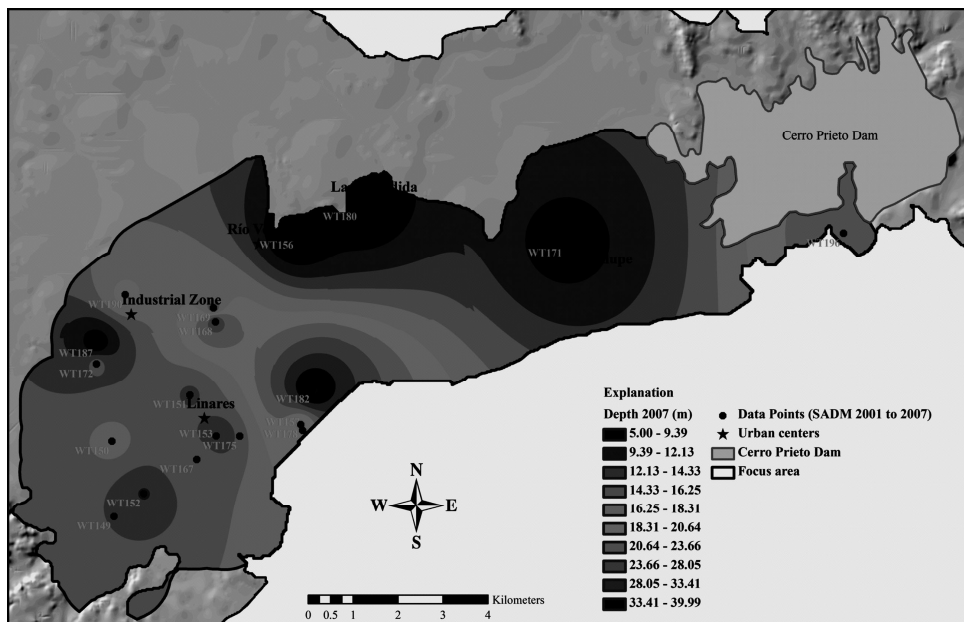


Figura 2. Profundidad del AS en 2007.

Vulnerabilidad de acuíferos

Para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos presentes en la zona de estudio se utilizó el método DRASTIC (Aller et al. 1987).

Este método analiza siete parámetros que son: profundidad del nivel freático, recarga, tipo de acuífero, tipos de suelo, topografía, impacto en la zona no saturada y conductividad hidráulica. El método considera una escala de valores paramétricos que va de 1=mínimo; a 10=máximo valores que representan el potencial de contaminación y una escala de ponderación de impactos 1=impacto menor hasta 5=impacto relevante; finalmente, el *Índice de Vulnerabilidad DRASTIC* (IVD) se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$IVD = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

Dónde:

r = Potencial de contaminación;

w = Impacto previsto

Para el cálculo del IVD se generó una base de datos de topografía, mapas de geología y de suelos, mediciones en campo del nivel piezométrico. Adicionalmente las características hidráulicas de los acuíferos fueron correlacionadas con bibliografía de acuerdo a la descripción litológica de los mismos con lo que

se generó un mapa temático de conductividad hidráulica.

Para cada uno de los parámetros que intervienen en el método DRASTIC se generó un mapa temático parametrizado tipo *raster* en ArcGIS (resolución de celda = 10X10 metros). La integración numérica de los siete mapas, se realizó utilizando la herramienta *raster calculator* que permitió obtener el mapa de vulnerabilidad intrínseca para la zona de estudio (Figura 3).

Hidrogeología urbana

Todas las urbes en el mundo experimentan un proceso evolutivo que puede ser dividido en cuatro etapas principales: a) Ciudad pre-industrial, b) Ciudad industrial, c) Ciudad post-industrial y d) La futura ciudad bajo cambio climático y crecimiento poblacional (Foster, Lawrence, and Morris 2001, Lerner 2004, Dowing 1994, Shanahan 2009).

La clasificación antes mencionada reúne los criterios y parámetros que intervienen en el ecosistema y que afectan el comportamiento dinámico del AS. Las características urbanas de la ciudad de *Linares* la ubican al inicio de la segunda etapa que es la *ciudad industrial*, escenario en el que se incrementa la demanda de agua con fines industriales y se consolida la sobreexplotación de AS.

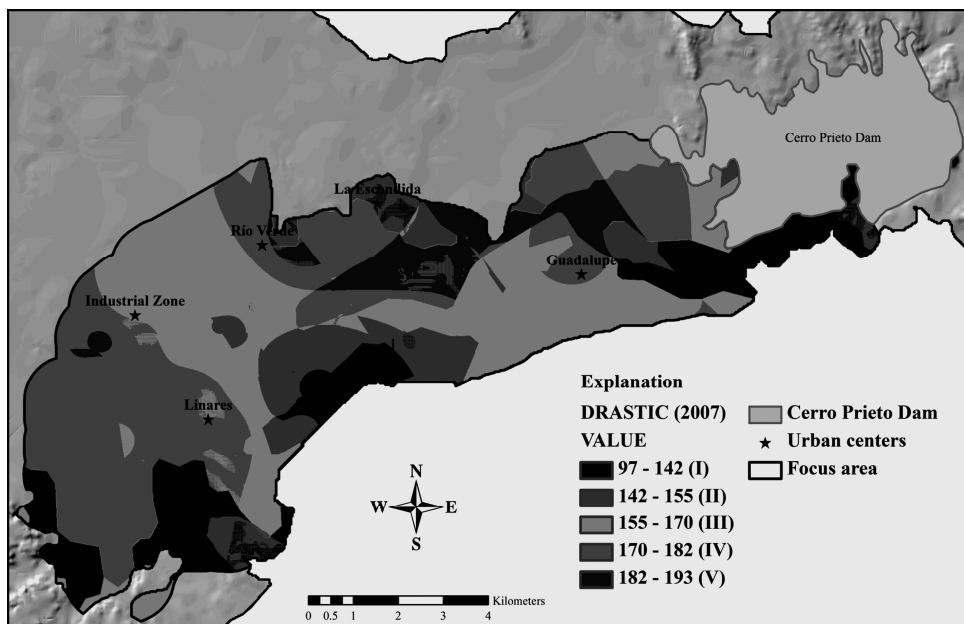


Figura 3. Mapa del Índice de vulnerabilidad DRASTIC.

En la Figura 4 se presenta el modelo conceptual del comportamiento de los acuíferos en Linares donde se ven los procesos urbanos que actualmente tiene la ciudad. En este modelo se puede ver la presencia de la actividad industrial, el incremento del número de pozos de extracción y el volumen extraído de agua para abastecer a la creciente población y la industria de la zona. A consecuencia de esta práctica se debería de presentar una modificación de los sistemas de flujo del AS.

Es importante denotar que las actividades tradicionales de las áreas periurbanas son la producción agrícola y pecuaria, las cuales utilizan importantes cantidades de fertilizantes químicos y abonos naturales para optimizar la producción de cítricos. A causa de las actividades antes descritas la calidad del AS se pudo haber deteriorado debido a la presencia de agentes externos introducidos al sistema gracias a la intervención y/o actividad humana.

Es claro observar que la economía de Linares está basada en la agricultura donde se siembra maíz, trigo, sorgo, avena forrajera y cítricos; la ganadería es menos significativa pero se fomenta la cría de ganado vacuno, asnal, caballar, caprino y bovino. El sector comercial está en crecimiento y es fuente de importantes ingresos económicos (HAL 2010).

Las industrias de la zona tienen sus actividades principalmente en metal-mecánica, hielo, materiales para construcción, fundición de hierro y acero, ensambladoras de cables, maquila de ropa, procesadoras de alimentos pre-cocidos, fábricas de muebles de madera, elaboración de envases plásticos y otras

actividades de menor dimensión (Dávila-Pórcel 2011).

Por otra parte, Linares tiene una distribución heterogénea de la densidad poblacional, la concentración de población es evidente en la zona centro y la tendencia de crecimiento es hacia el este y norte de la mancha urbana. La zona central tiene densidades que alcanzan los 16,000 hab./km², corroborando el importante crecimiento demográfico en esta urbe.

Con el objetivo de identificar zonas de riesgo a la contaminación, se introdujo el *uso de suelos* (US) que en cualquier ciudad refleja el crecimiento urbano y la diversificación de actividades antropogénicas de manera directa, razón por la cual, esta variable sirve para obtener el Índice de Riesgo a la Contaminación (IRC). Para poder utilizar esta nueva variable, se creó un mapa parametrizado del uso del suelo con valores entre 1= importancia poco significativa y 10= importancia significativa, de acuerdo a la clasificación propuesta por Panagopoulos (2006). Este mapa generado en formato raster tiene las mismas características de los mapas utilizados para calcular el IVD por el método DRASTIC, este resultado parcial fue utilizado como mapa base y se añadió la variable US de acuerdo a la siguiente relación matemática:

$$IRC = IVD + US_r \cdot US_w$$

Dónde:

IRC = Índice de riesgo a la contaminación

IVD = Índice de vulnerabilidad DRASTIC

US_r = Valor para el uso de suelo

US_w = Índice de Impacto del Uso de Suelo

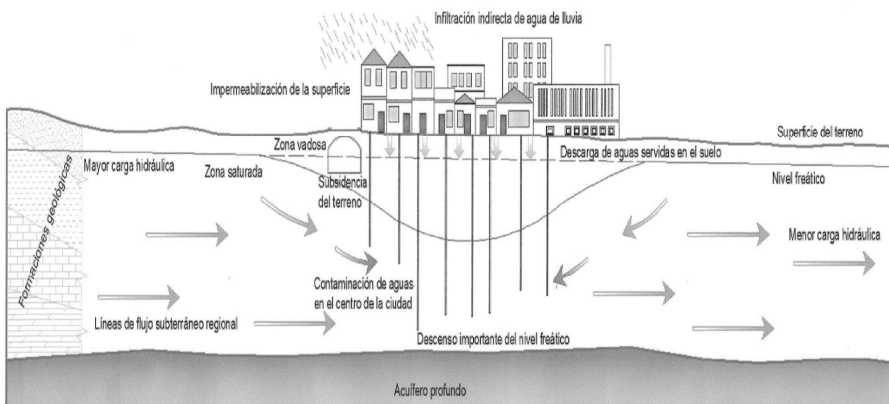


Figura 4. Modelo conceptual de la hidrogeología urbana en Linares, México; modificado de Foster (2001); Lerner (2004).

Resultados y discusión

El agrupamiento de los valores calculados en cada celda del raster IRC resultante fue realizado utilizando el método estadístico de cuantiles de igual forma que se realizó para las categorías del modelo DRASTIC.

El mapa IRC, denota las áreas con mayor riesgo a la contaminación producida por los seres humanos por el desarrollo de las actividades urbanas e industriales, las zonas más susceptibles de ser contaminadas son las mostradas en gris obscuro y las áreas en gris claro son las menos susceptibles a la presencia de contaminantes según el modelo IRC.

Con el objetivo de verificar la distribución de zonas de riesgo propuestas por el modelo IRC de la posible afectación ambiental por las actividades urbanas de la ciudad de Linares, se realizó un análisis hidrogeoquímico de una serie de muestras de AS para el periodo comprendido entre 1981 (21 muestras) y 2009 (23 muestras).

Los resultados de las muestras obtenidas en las áreas urbanas y peri-urbanas de Linares,

presentan altos valores de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- y SO_3^{+2} , permitiendo interpretar la presencia de aguas mineralizadas de manera natural. El resultado de la inclusión de la ciudad de Linares en el modelo IRC, por medio de un análisis hidrogeoquímico infiriéndose a un flujo regional o que las AS podrían estar químicamente modificadas por la introducción de agentes externos al sistema.

La presencia de cloruros y sulfatos son indicadores de una evolución hidrogeoquímica regional o del probable impacto antropogénico sobre la calidad del AS.

Debido a que los nitratos no tienen una fuente natural que pueda explicar su presencia en el AS de los acuíferos de la zona, fue posible utilizar los contenidos de nitratos en calidad de trazadores de la afectación que la ciudad pudo producir en los acuíferos de la zona.

Para evidenciar la progresiva contaminación del AS se realizó un análisis de la evolución del contenido y distribución de los nitratos en el área de estudio a lo largo de 28 años (1981-2009) (Figura 5).

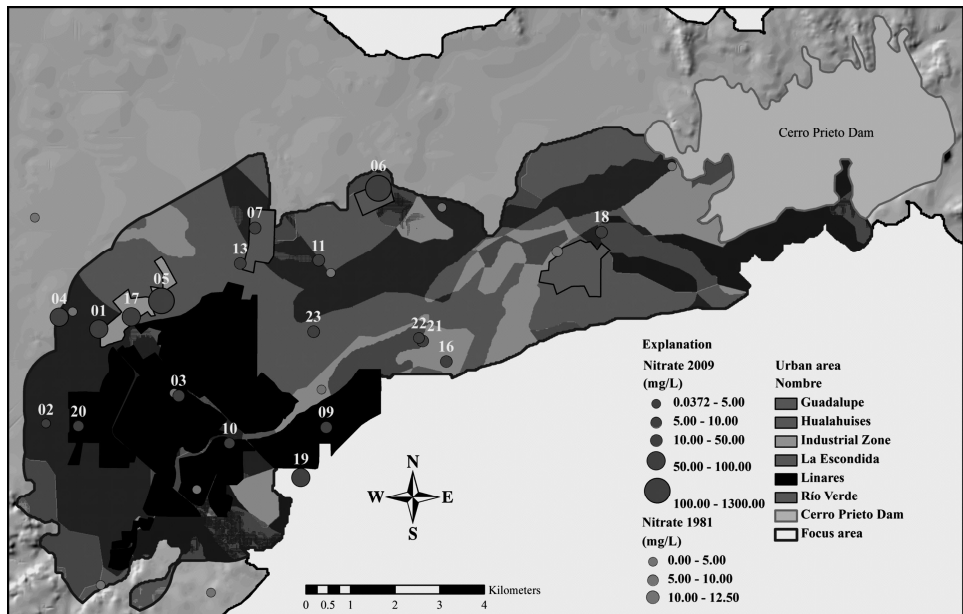


Figura 5. Índice de riesgo a la contaminación y presencia de nitratos.

Los contenidos de nitrato obtenidos para el 2009 superan los valores máximos permitidos por la normativa mexicana e internacional en

varias muestras, mientras que los contenidos de nitrato de las muestras obtenidas en 1981 son mucho menores,

Conclusiones

Se realizó la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero con DRASTIC obteniéndose 5 categorías de vulnerabilidad con aplicación de un sistema de información geográfica.

El uso de suelos demostró ser una variable importante que refleja las actividades que desarrolla la población y que puede afectar la calidad del AS, por medio de esta variable fue posible proponer un nuevo índice orientado al "riesgo de contaminación del acuífero" (IRC).

La incorporación de nuevas variable para desarrollar un estudio de Hidrogeología Urbana demostró ser útil para el análisis de los problemas de contaminación, gestión, administración e impacto ambiental producidos por las actividades urbanas y antropogénicas sobre el AS y los acuíferos sobre los cuales están emplazadas las urbes.

El contenido y distribución de nitratos es una variable que permite realizar la verificación de los modelos obtenidos con el IRC, hecho que demuestra la validez del modelo geo-numérico obtenido.

Se evidencio también que la presencia de nitratos en el AS se incrementó considerablemente a lo largo de las últimas tres décadas, hecho verificable a través de la evolución hidrogeoquímica del AS, adicionalmente, este deterioro de la calidad del AS coincide de manera directa con el incremento poblacional, la implementación de industrias y el boom de la producción de cítricos en la zona de estudio y alrededor de Linares.

Las conclusiones del estudio evidencian que existe impacto antropogénico sobre el AS de los acuíferos donde se desarrolla la actividad urbana y peri-urbana de Linares.

Finalmente, la utilización de este nuevo concepto y su metodología aplicada y herramientas de optimización, como lo es el mapa IRC, son determinantes para entender mejor los sistemas urbanos.

Se concluye que un estudio de Hidrogeología Urbana, puede tener un alto impacto social y económico en las urbes y que debe ser considerado como una herramienta clave en la planificación y gestión sostenible del territorio y de los recursos hídricos subterráneos.

Referencias

Aller, L., T. Bennett, J.H. Lehr, R.H. Petty, and G. Hackett. 1987. DRASTIC: a standardized

system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Vol. USEPA Report 600/2- 87/035. Ada, Oklahoma: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.

Custodio, E. 2004. "Hidrogeología Urbana: una nueva rama de la ciencia hidrogeológica." Boletín Geológico - Minero no. 115:283 - 288.

De la Garza-González, S.I. 2000. Estudio geológico/hidrogeológico de la región citrícola Linares-Hualahuises, Nuevo León, NE-México., Facultad de Ciencias de la Tierra., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León., Linares, Nuevo León, México.

De León-Gómez, H. 1993. Die Unterläufigkeit der Talsperre José López Portillo / Cerro Prieto auf einer Kalkstein - Mergelstein - Wechselfolge bei Linares, Nuevo León / México., Mittelleilung zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH - Aachen, Aachen.

Dowing, R.A. 1994. Keynote paper: Falling groundwater levels - a cost-benefit analysis. Paper read at Groundwater problems in urban areas. Proceedings of the International Conference organised by the Institution of Civil Engineers, at London 2-3 June 1993.

Drescher, H. 1995. Geologische und Hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, Nuevo Leon, Mexico., Christian Albrechts-Kiel. Universität, Christian Albrechts-Kiel Universität, Kiel.

Dávila-Pórcel, R.A. 2011. Desarrollo sostenible de usos de suelo en ciudades en crecimiento, aplicando Hidrogeología Urbana como parámetro de planificación territorial: caso de estudio Linares, N. L., México., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares.

Foster, S., A. Lawrence, and B. Morris. 2001. Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano: Evaluación de las necesidades de gestión y formulación de estrategias. Washington D.C.: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.

Galván-Mancilla, S.M. 1996. Cartografía Hidrogeológica de la terraza baja entre Hualahuises y Linares, N.L. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León., Linares, Nuevo León, México.

Garza-Jiménez, F. 1993. Mapeo Geológico en el área Purísima de Conchos, Linares, Nuevo León y análisis de sedimentos fluviales de los ríos Pablillo, Potosí, Anegado y Conchos en al misma área., Facultad de Ciencias de la

- Tierra, Univesidad Autónoma de Nuevo León., Linares, Nuevo León, México.
- HAL. Honorable Ayuntamiento de Linares. Administracion 2009-2012. Gobierno Municipal de Linares 2010. Available from <http://www.linares.gob.mx/historia.htm>.
- INEGI. 2010. Censo de Población y Vivienda 2010. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Lerner, D.N. 2004. Urban Groundwater Pollution. Edited by International Association of Hydrogeologists: Taylor & Francis.
- Llamas, M.R., and E. Custodio. 2003. "Intensive use of groundwater: challenges and opportunities." *Balkema, Liese*:1-471.
- Morris, B.L., W.G. Darling, A.A. Cronin, J. Rueedi, E.J. Whitehead, and D.C. Gooddy. 2006. "Assesing the impact of modern recharge on a sandstone aquifer beneath a suburb of Doncaster, UK." *Hydrogeology Journal* no. 14 (6):979-997.
- Riecke, R. 1995. *Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Raum Linares, Nuevo León, Mexiko.*, Christian Albrechts - Kiel Universität., Kiel, Deutschland.
- Ruíz-Martínez, M.A., and J. Werner. 1997. "Research into the quaternary sediments and climatic variations in NE Mexico." *Quaternary International* no. 43/44:145-151.
- Shanahan, P. 2009. "Groundwater in the urban environment." In *The water environment of cities*, edited by L.A. Baker, 29-48. Washington, DC: Springer.
- Vázquez-Suñe, E., X. Sánchez-Vila, and J. Carrera. 2005. "Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain." *Hydrogeology Journal* no. 13:522-533.